

Controlo do sistema de potência, FACTS - tópicos

Manuel Matos, Vladimiro Miranda

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal

Versão 1.1 - Abr 2002 (1.0 - Dez 2001)

Este texto foi baseado num conjunto de transparências preparadas pelo Prof. Manuel Matos para apoio à introdução do tema aos alunos das disciplinas de SEE no 4º ano da LEEC.

1. INTRODUÇÃO

Este texto transcreve o conteúdo de transparências originalmente organizadas pelo primeiro autor como instrumento didáctico para ensino em disciplinas de Sistemas Eléctricos de Energia, na LEEC - Licenciatura em Engenharia Electrotécnica e de Computadores da FEUP.

Por este motivo, não se apresenta ao leitor um texto literariamente organizado, mas apenas um conjunto de tópicos para estruturar o conhecimento e permitir-lhe organizar, de forma sistemática, pesquisas sobre os assuntos abordados.

O tema central deste texto respeita ao controlo de um sistema de potência (também designado Sistema Eléctrico de Energia - SEE). Os tópicos abordados respeitam à identificação das possibilidades mais comuns de controlo, às formas mais clássicas de o efectuar com equipamento convencional e à utilização de FACTS.

2. FLUXO DE POTÊNCIA (TRANSPARÊNCIA 1)

Dados

- rede (linhas, transformadores, baterias de condensadores, topologia)
- cargas (P_L , Q_L ou Y_{eq})
- Produção (P_G) excepto no barramento de referência
- Produção (Q_G) nos barramentos PQ
- Tensões ($|V|$) nos barramentos PV e de referência

Resultados

- Tensões ($|V|$, θ)
- Trânsito (P , Q) nas linhas e transformadores
- Produção (P_G) no barramento de referência
- Produção (Q_G) nos barramentos PV e de referência
- Perdas activas e reactivas

Possíveis acções de controlo

- na produção P_G (despacho económico, OPF - optimal power flow)
- na fixação de $|V|$ especificado por acção na excitação de geradores
- na fixação de $|V|$ por regulação de tomadas de transformadores
- na fixação de $|V|$ por regulação de baterias de condensadores
- na produção Q_G em compensadores síncronos
- na actuação de tomadas em transformadores esfasadores
- no comando de dispositivos de FACTS (Flexible AC Transmission Systems)

3. CONTROLO (TRANSPARÊNCIA 2)

Especificação de $|V|$ nos nós PV

SISTEMA: excitação de alternadores

MODELO: injeção de Q nas barras PV

OBJECTIVOS: controlo das tensões, transito de Q e perdas

RESULTADO: Q_G

Especificação de $|V|$ em baterias de condensadores

SISTEMA: introdução de elementos da bateria

MODELO: supõe-se variação contínua, com ajuste final para valor discreto

OBJECTIVOS: controlo das tensões, transito de Q e perdas

RESULTADO: posição da tomada

Especificação de $|V|$ num barramento ligado a transformador com tomadas (relação de transformação real)

SISTEMA: Variação da relação de transformação

MODELO: injeção de potências reactivas fictícias nos extremos do transformador; supõe-se variação contínua, com ajuste final para valor discreto da tomada do transformador

OBJECTIVOS: controlo da tensão

RESULTADO: posição da tomada

Especificação de P_{ik} num transformador esfasador

SISTEMA: adição de uma tensão em quadratura

MODELO: injeção de potências reactivas fictícias nos extremos

OBJECTIVOS: controlo do trânsito de potência activa

RESULTADO: ângulo de esfasamento

FACTS

Todas as acções anteriores, mas utilizando interruptores estáticos, conversão AC/DC/AC, etc.

OBJECTIVOS: maior rapidez de controlo [problemas dinâmicos]

4. TRANSFORMADOR COM TOMADAS REGULADAS EM CARGA (TRANSPARÊNCIA 3)

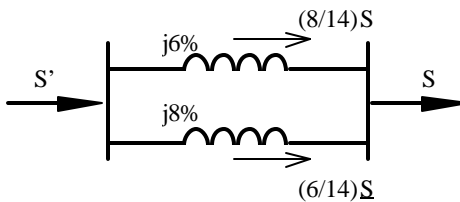
Na literatura anglo-saxónica, estes transformadores aparecem por vezes designados como TCUL - tap changing under load.

REGULAÇÃO DE TENSÃO

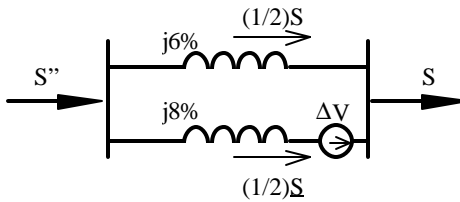
Princípio: variação da razão de transformação, por alteração do número de espiras envolvidas

Exemplos de utilização:

1. Subestações: manter fixa a tensão no secundário
2. Repartição de cargas por transformadores em paralelo com reactâncias de fugas distintas



A carga não é repartida igualmente. Um dos transformadores está subaproveitado. O outro pode estar em sobrecarga.

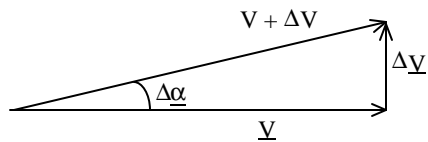


Com a alteração da relação de transformação, consegue-se equilibrar *aproximadamente* (não esquecer que as tomadas são discretas!) a carga nos dois transformadores.

5. TRANSFORMADOR ESFASADOR (TRANSPARÊNCIA 4)

Na literatura anglo-saxónica, estes transformadores aparecem por vezes designados como Phase-Shifters. Podem aparecer em série em linhas de transporte.

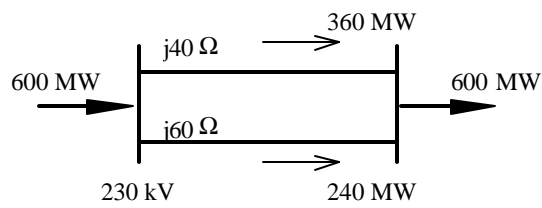
Princípio: Adicionar a cada fase uma tensão variável, em quadratura.



Para pequenos valores, a variação de fase $\Delta\alpha$ é aproximadamente proporcional a ΔV .

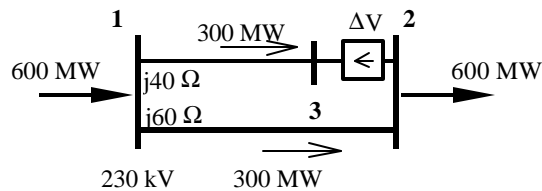
Exemplo de utilização:

Desequilíbrio de distribuição do fluxo de potência activa, devido às impedâncias distintas das linhas em paralelo



$$\delta = \theta_1 - \theta_2 = 15,8^\circ$$

Introduzindo o transformador esfasador, para igualar o fluxo em cada linha



$$P_1 = 300 = \frac{230^2}{40} \sin(\delta - \alpha)$$

$$\delta = 19,89^\circ$$

$$P_2 = 300 = \frac{230^2}{60} \sin \delta$$

$$\alpha = 6,75^\circ = 0,118 \text{ rad}$$

$$|\Delta V| \cong \alpha |V_2| \cong \frac{230}{\sqrt{3}} \times 0,118 = 15,6 \text{ kV}$$

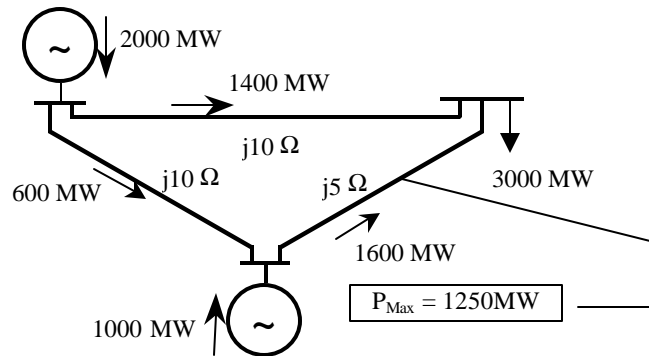
(TRANSPARÊNCIA 5)

Utilidade

É possível ultrapassar limitações impostas pelas impedâncias das linhas, “forçando” o trânsito de potências pretendido.

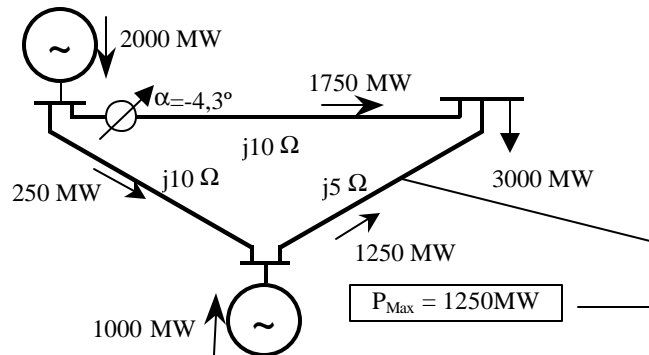
Podem assim utilizar-se melhor as capacidades de transporte das linhas.

Outro exemplo



Admita-se que a linha que transporta 1600 MW está em sobrecarga, pois o seu limite máximo é de 1250 MW. Nesta situação, ou se altera o despacho de geração ou se introduz uma correção nos ângulos das tensões por forma a encaminhar o fluxo de potência do modo pretendido (por forma a evitar colocar linhas em sobrecarga).

Introdução de um transformador esfasador:



Atenção!

Não confundir este processo de *controlo* com o facto de os transformadores introduzirem uma variação de fase, na tensão secundária, em função do seu grupo horário de ligação!

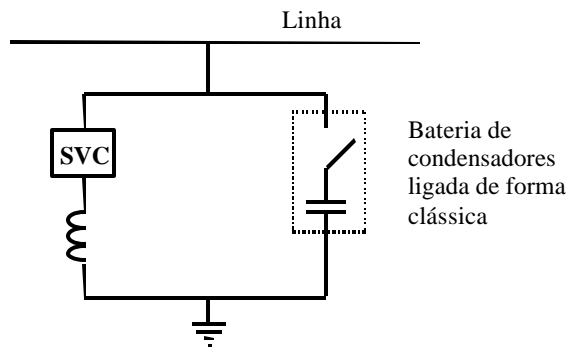
6. FACTS (TRANSPARÊNCIAS SEGUINTE)

FACTS – Flexible AC Transmission Systems

Dispositivos relativamente recentes, baseados no uso de electrónica de potência, para controlo rápido de potência activa e reactiva.

Compensador estático – SVC (Static Var Compensator)

Controla a potência reactiva através da introdução e retirada de baterias de condensadores ou reactâncias por meio de tiristores. Normalmente é combinado com ligações clássicas dos mesmos dispositivos.



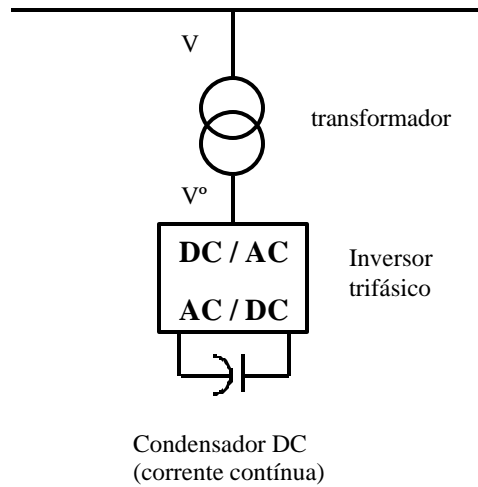
O funcionamento é semelhante ao dos conjuntos clássicos, mas há algumas vantagens no funcionamento dinâmico. Há sistemas destes desde o fim dos anos 1970.

Condensador estático – STATCON

Compensador síncrono estático – STATCOM

Muito mais recente, exige o uso de um novo tipo de tiristores (GTO – Gate Turn Off). Instalação inicial em 1995 (TVA – Tennessee Valley Authority, Sullivan Substation, ± 100 MVar).

Princípio básico: injeção de uma tensão V° em fase com a tensão de rede V . Se for $V^\circ > V$, o dispositivo injecta potência reactiva. Se for $V^\circ < V$, o dispositivo absorve potência reactiva. Ou seja, comporta-se como um compensador síncrono mas sem partes móveis, respondendo mais rapidamente a acções de controlo e não contribuindo para correntes de curto-circuito.



A capacidade de intervenção no controlo de tensão é maior do que a dos SVC pois não está limitado pela dependência do quadrado da tensão.

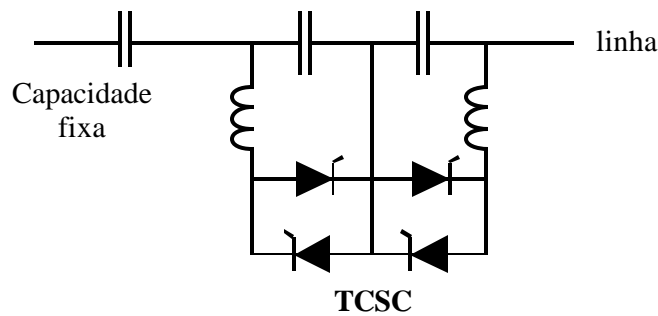
Condensador em série controlado por tiristores (TCSC – Thyristor-controlled series capacitor)

A ideia é antiga: diminuir a reactância série da linha introduzindo uma capacidade em série.

Equação potência-ângulo:

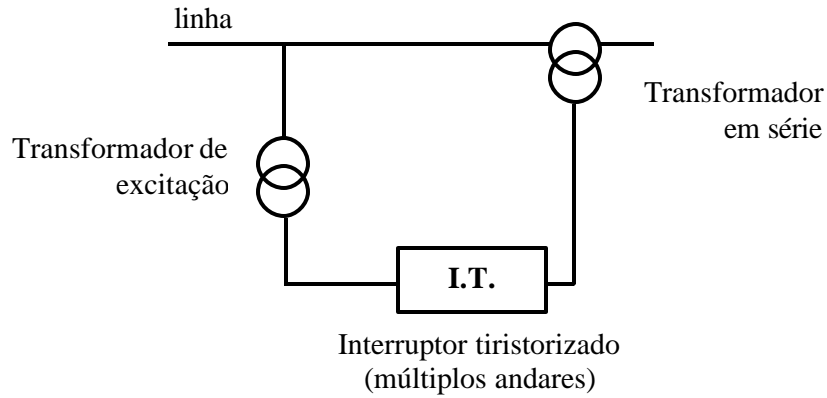
$$P_{ik} = \frac{V_i V_k}{X_{ik}} \sin \theta_{ik} \quad , \quad \text{donde} \quad P_{ik}^{Max} = \frac{V_i V_k}{X_{ik}} \quad \text{e assim} \quad P_{ik}'^{Max} = \frac{V_i V_k}{X_{ik} - X_c} > P_{ik}^{Max}$$

Na versão mais simples, podem surgir problemas e comutação (mecânica) e, sobretudo, de ressonância subsíncrona. A versão controlada por tiristores evita esses dois problemas. Por razões de custos, há tendências para sistemas mistos. Um sistema desse tipo funciona desde 1992 (Western Area Power Administration) permitindo aumentar a capacidade de uma linha de 300 para 400 MW. Outro sistema é explorado pela BPA – Bonneville Power Administration, Oregon, Slatt Substation, com uma capacidade de 208 MVar.

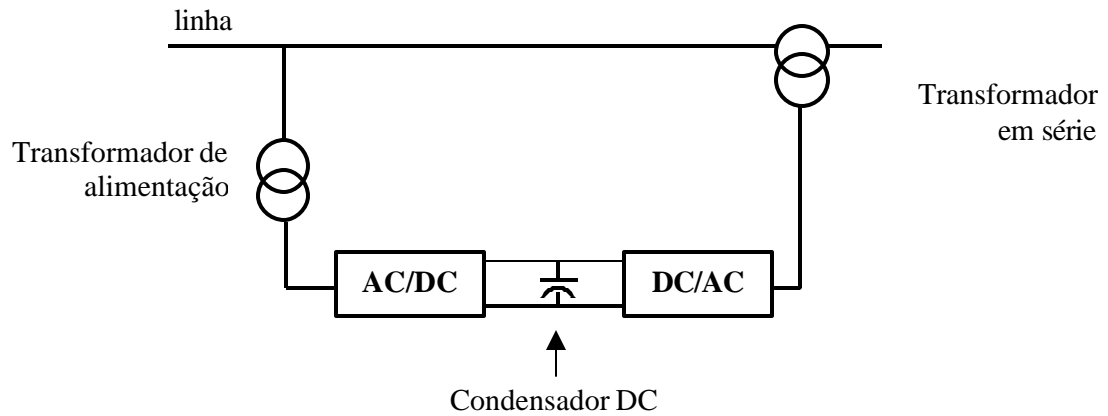


Regulador de fase estático (PAR – Phase Angle Regulator, TCPAR – Thyristor controlled PAR)

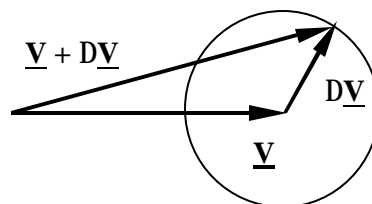
Segue o princípio do transformador esfasador, ao adicionar à tensão da linha uma componente em quadratura.



Controlador Unificado de Potência (UPFC – Unified Power Flow Controller)



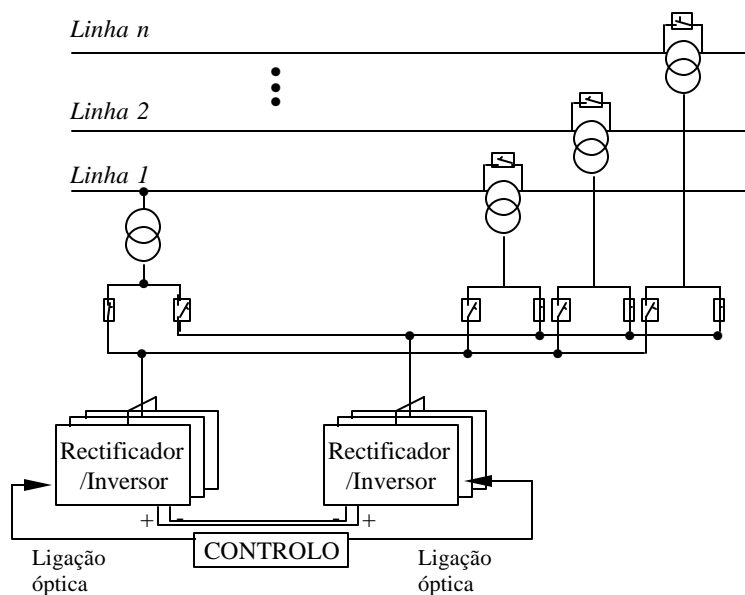
Este controlador insere na linha uma tensão com o esfasamento que se pretender.



Isto permite controlar *independentemente* a potência activa e reactiva, acumulando as funções e utilidade de dispositivos anteriores. Há uma instalação de um sistema deste tipo numa linha da AEP – American Electric Power, Inez substation, permitindo o equivalente à inserção de ± 160 MVar de capacidade em série e ± 160 MVar de capacidade em derivação.

Compensador estático convertível (CSC – Convertible Static Compensator)

Este equipamento é concebido para executar múltiplas funções, ganhando em economias de escala e em flexibilidade. Para além de funções semelhantes às de um UPFC e de compensador estático, permite o controlo simultâneo de várias linhas, num estilo de operação coordenada designado por IPFC – Interline Power Flow Controller.



Um equipamento deste tipo está a ser instalado (Março de 2000) pela NYPA – New York Power Authority na sua Marcy Substation, contendo 100 blocos rectificador/inversor e tendo capacidades para controlar ± 200 MVar em série e ± 200 MVar em derivação, alternativamente, ou ± 100 MVar série, ± 100 MVar derivação em simultâneo. Os benefícios esperados pela NYPA são um incremento da capacidade de transporte de 240 MW, com alívio de situações de congestão de trânsito de potência, máxima utilização da capacidade da rede, melhoria da capacidade de regulação de tensão e redução das perdas de energia.

REFERÊNCIAS

Algumas das figuras e exemplos foram adaptados das seguintes referências:

- [1] Edris, A., "FACTS Technology Development: an Update", IEEE Power Engineering Review, vol.20, no.3, Mar 2000.
- [2] Edris, A. et al, "Controlling the flow of real and reactive power", IEEE Computer Applications in Power, Vol.11, No.1, Jan. 1998.
- [3] Gotham, D.J., "Flexible AC Transmission systems in power network analysis and for power flow control", PhD Thesis, Purdue University, 1996.
- [4] Gotham, D.J., Heydt, G.T., "Power flow control and power flow studies for systems with FACTS devices", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.13, No.1, 60 -65, Feb. 1998.
- [5] Hingorani, N.G., "Flexible AC transmission", IEEE Spectrum, Vol.30, No.4, April 1993.
- [6] Noroozian, M. et al, "Use of UPFC for optimal power flow control", Proceedings of IEEE Stockholm Power Tech, Stockholm, 1995.